

アフターボンドPC鋼材の硬化判定手法について

讃岐 康博*1・野村 勝義*2・増田 洋児*3・望月 秀次*4

1. まえがき

日本の道路網はおおむね2000年を目標年次とする四全総の構想のもと、全国のネットワーク化が着実に進められている。一方、高度経済成長期に建設された橋梁は、当時の設計時には予想だにできなかった過酷な交通条件による疲労損傷や、施工時の人為的ミスなどに起因する損傷が表面化し、補修・補強などの更新を余儀なくされているものも少なくない。

この中には、メンテナンスフリーを最大のメリットとして開発されたPC橋梁も例外ではなく、鋼棒の突出事故や落橋りという最悪の事態にまで至った事例も報告されている。

こうした事例のほとんどは、ポストテンション方式の橋梁において発生しており、シース内のグラウト充填不足に起因する鋼材の腐食破断が原因と考えられている。このような背景のもと、グラウト不足を防止するため、ノンブリージングのグラウト材料や鋼材とシースとの空隙率の見直しなど、充填性能を改善させるための工夫が施されている。

また、グラウト工という工程自体を不要とするポストテンション工法用の緊張材として、「アフターボンドPC鋼材」が開発され、橋梁の床版横締めとして使用されている。このアフターボンドPC鋼材は、緊張時にはアンボンドPC鋼材と同等な取扱いができ、緊張定着後には樹脂が硬化することにより、コンクリートとの付着が得られるものである。ただ、樹脂は長期(6ヵ月~1年)硬化型であるため、その硬化確認手法の確立が重要な課題となっている。

日本道路公団四国支社では、大洲工事事務所管内松山自動車道の「城廻橋」において、アフターボンドPC鋼材の樹脂硬化判定手法確立を目的とした実橋調査が計画されている。

本稿は、実橋調査に先立って供試体を用いた種々の非破壊手法による実験結果をもとに、アフターボンドPC鋼材におけるコンクリート中での樹脂硬化判定に関し、「絶縁抵抗測定法」が現時点の最適手法であることを提案している。

2. アフターボンドPC鋼材の諸特性

2.1 アフターボンドPC鋼材の概要

アフターボンドPC鋼材は、図-1に示すようにPC鋼材の表面を未硬化の常温硬化型エポキシ系樹脂とポリエチレンシースで被覆したもので、樹脂の硬化促進剤の添加量をコントロールすることにより、硬化時期を自由に設定できるものである。

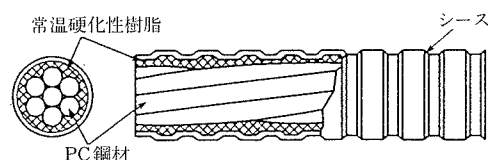


図-1 アフターボンドPC鋼材の概要²⁾

アフターボンドPC鋼材使用時の利点としては、次のようなものがある。

- ① 所定の位置に配置し、緊張定着するだけでよく、シースの配管、鋼材の挿入、グラウト作業が必要ないため施工が容易である。
- ② 摩擦係数が小さい。
- ③ 一定期間後に樹脂が自然硬化し、シースを介してPC鋼材とコンクリートとが一体化する。
- ④ 樹脂とポリエチレンシースで被覆された二重防食構造であるため、耐水性、耐薬品性、耐食性、耐候性に優れている。
- ⑤ シース径がメタルシースに比べて小さいため、薄いスラブにも使用でき、配筋設計が容易である。

2.2 樹脂の硬化特性

使用しているエポキシ系樹脂は、常温硬化型であるが、硬化は時間の経過とともに徐々に進行するものである。製造の時点であらかじめ緊張時期を考慮して、アミン系硬化促進剤の添加量を決めて混合すれば、硬化時期を6ヵ月後あるいは1年後に設定することも可能である。

図-2は、6ヵ月で硬化するように調整されたエポキシ樹脂の稠度と時間の関係を示したものである。

稠度は、アンボンドPC鋼材のグリース軟度の目安として用いられている尺度³⁾であるが、ここでは樹脂の硬化指標として用いており、測定はJIS規格K2560に従って実施したものである。アンボンドPC鋼材のグリースの稠度は約300である⁴⁾ので、図-2によるとアンボンドPC鋼材と同様に取り扱える期間は約3ヵ月間と言え、それ以上になると次第に緊張時の摩擦係数が大きくなり、最終的には緊張できなくなる。

2.3 樹脂の硬化判定に関する問題

このように樹脂の硬化時期の判定は、鋼材緊張時の猶予期間の判定や、緊張後のコンクリートとの一体化判定など、アフターボンドPC鋼材の品質管理にとって非常に重要と言える。

前述した樹脂の硬化指標として用いている稠度試験は、樹脂単体の試験方法で、アフターボンドPC鋼材の製品を対象としたものではない。とくにコンクリート中で徐々に硬

*1 Yasuhiro SANUKI: (株)フジエンジニアリング 調査設計部 調査第二部 部長

*2 Katsuyoshi NOMURA: (株)フジエンジニアリング 調査設計部 調査1課 主任

*3 Yoji MASUDA: 神鋼鋼線工業(株) PC加工品技術部 部長

*4 Hidetsugu MOCHIZUKI: 日本道路公団四国支社 建設部 構造技術課 課長

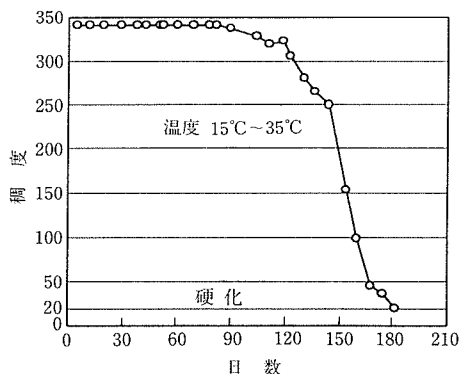


図-2 樹脂の硬化状況²⁾(6ヵ月硬化用)

化していく樹脂に適用できるものではなく、実橋における硬化判定手法の確立が重要となっている。

3. アフターボンドPC鋼材の硬化判定実験

3.1 実験用供試体

実験用供試体として、図-3に示すような300mm×300mm×5 000mmの供試体2体を作成し、その断面中央に、アフターボンドPC鋼材を配置した。アフターボンドPC鋼材は19本よりで、呼び名φ21.8mm、シース径30.5mmのものを使用した。また、樹脂の硬化に対する促進養生は、60℃～70℃の蒸気養生を3週間行った。

3.2 硬化判定手法

実橋で測定することを前提に、アフターボンドPC鋼材の硬化判定が可能と考えられる次の2手法について実験を行い、最適手法について検討を行った。

(1) 反応熱測定法

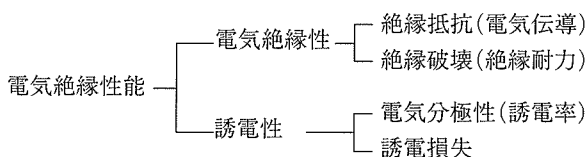
シースリブ内の樹脂(供試体端部から1m、2.5m地点の2ヵ所)を対象に、樹脂硬化過程における反応熱の経時変化を熱電対とデータロガーの組合せでコンクリート打設時から促進養生終了までを連続測定した。

反応熱測定で使用した熱電対の仕様を表-1に示した。

なお、樹脂温度は外気温、コンクリートの硬化熱、養生温度などに影響されるため、それぞれの温度も写真-1に示すように熱電対によって測定した。

(2) 絶縁抵抗測定法

エポキシ樹脂は、その機能として接着性、防食性、成形性を有し、硬化体は機械的、熱的、電気的性質に優れているため、工業分野をはじめとして各分野に多種多様に利用されている。とくに近年、優れた電気絶縁性を利用して、電気部品や電子部品の封止、含浸および注型などの成形用に供せられている。一般に絶縁材料の絶縁性能は、以下のように要約される⁵⁾。



今回の実験では、上記電気絶縁性能のうち絶縁抵抗に着目し、硬化過程における抵抗値の経時変化を測定した。

測定方法としては樹脂温度測定と同様、シースリブ内の樹脂(反応熱測定と同一箇所)に、電極を鋼材に接触させないように差し込み(写真-1)、その電極間の抵抗値(以下、絶縁抵抗という)をハイレジスタンスメータによって測定記録した。ハイレジスタンスメータの仕様を表-2に示す。

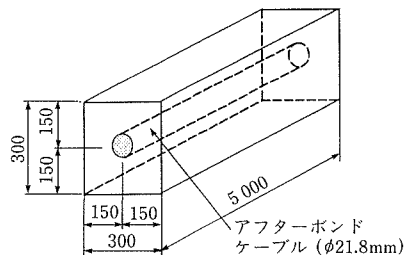


図-3 実験用供試体の寸法

表-1 熱電対の仕様

使用熱電対	タイプT (C-C)
構成材料	+極 : 銅 -極 : コンスタンタン
素線径	1.0mm
使用限度	常用限度 : 250℃ 加熱使用限度 : 350℃
許容誤差	±1℃または測定温度の±0.75%
測定間隔	データロガー側で自由に設定可能

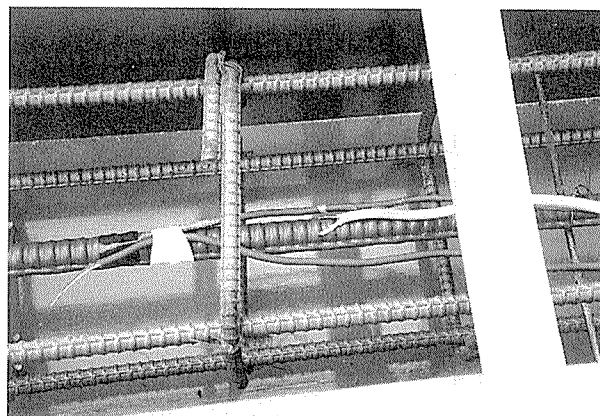


写真-1 樹脂の温度、絶縁抵抗の測定法

表-2 ハイレジスタンスメータの仕様

測定パラメータ	R (直流抵抗), I (直流電流) Ps (表面抵抗率), ρv (体積抵抗率)
測定レンジ	1KΩ ~ 1.6×10 ¹⁶ Ω
測定印加電圧	0.1 V _{dc} ~ 1 000 V _{dc} (今回は100 V _{dc})
動作温度	0℃ ~ 55℃
測定基本確度	0.6%
サンプリング個数	1回 ~ 500回の間で自由に設定可能
サンプリング間隔	1sec ~ 900secの間で自由に設定可能

4. 実験の実施時期

実験は、基本的には樹脂硬化前・中・後の経時変化を把握することを目的としていることから、表-3に示す各工程に合わせた時期に実施した。なお、実験結果の再現性を確認するため、2供試体で樹脂硬化促進養生(蒸気養生)の時

表-3 実験の実施時期

実験工程	調査時期	供試体No.	反応熱	絶縁抵抗値
型枠組立て	ケーブル配置後	I, II	○	-
コンクリート打設	打設直後	I, II	○	○
ケーブル緊張	緊張3日後	I, II	○	○
蒸気養生	養生2週間後	I, II	○	○
養生停止	停止10日後	I, II	○	○

期をずらせて実施している。

また、反応熱測定は連続測定が可能であるが、絶縁抵抗値測定はシステムの仕様上、1測点ずつでしかも1時期あたり最長でも15分間隔500回しかサンプリングできず、スポット的な測定となっている。

5. 実験結果

5.1 反応熱測定結果

図-4は、反応熱測定結果を供試体型枠組立て後から実験終了までの各施工段階の4日間程度に着目し、経時変化図としてまとめたものである。

図-4より、以下のことが言える。

(1) 型枠組立て後

供試体 I, II ともに樹脂の温度変化は外気温に追従した変化を示している。

(2) コンクリート打設後

コンクリート打設直後からコンクリートの水和熱により、コンクリート、樹脂ともに25℃程度まで温度上昇し、外気温と約15℃の温度差が現れている。このコンクリートの水和熱は、マスが小さいため樹脂が硬化するとされる70℃~80℃を大幅に下回っていることから、コンクリートの水和熱によって樹脂が硬化することはないものと考えられる。

樹脂温度も水和熱に追従して変化しており、樹脂温度とコンクリート温度に差は見られない。

(3) 樹脂硬化養生中

蒸気養生により養生中のコンクリート内部および樹脂の温度はほぼ一定な値を示している。ただ、供試体端部から1.0m地点と2.5m地点の温度変化を比較すると、2.5m地点の方が蒸気の噴出し口に近いため、樹脂温度、コンクリート温度とともに1.0m地点よりも5℃~10℃の高い値を示している。

樹脂温度とコンクリート温度を比較すると、供試体 I の2.5m地点では樹脂温度の方がコンクリート温度に比べ5℃程度高い値を示している。また、供試体 II の2.5m地点では樹脂の温度の方が1℃~2℃とわずかに高い値を示している。この両者の温度差が樹脂の硬化反応熱の可能性もあるが、両供試体の1.0m地点での樹脂とコンクリートとに温度差が認められないこと、また両供試体で傾向が異なることから反応熱とは考えにくく、この温度差を樹脂硬化判定の指標とはできない。

(4) 養生終了後

養生終了後においても、樹脂温度、コンクリート温度に差はなく、外気温に追従した温度変化を示している。

5.2 絶縁抵抗値測定結果

(1) 樹脂硬化過程における絶縁抵抗値の変化

コンクリート打設後から養生終了までの絶縁抵抗値の経時変化を図-5に示した。また、図-5から数値を読み取り表-4にまとめた。

図中、供試体 I の1.0m地点は、反応熱測定と同様、各施工段階の4日間の経時変化となっているが、ほかの測定については、測定器の仕様上、各施工段階で1回のスポット計測結果(10秒間隔の抵抗値を20回連続計測)となっている。

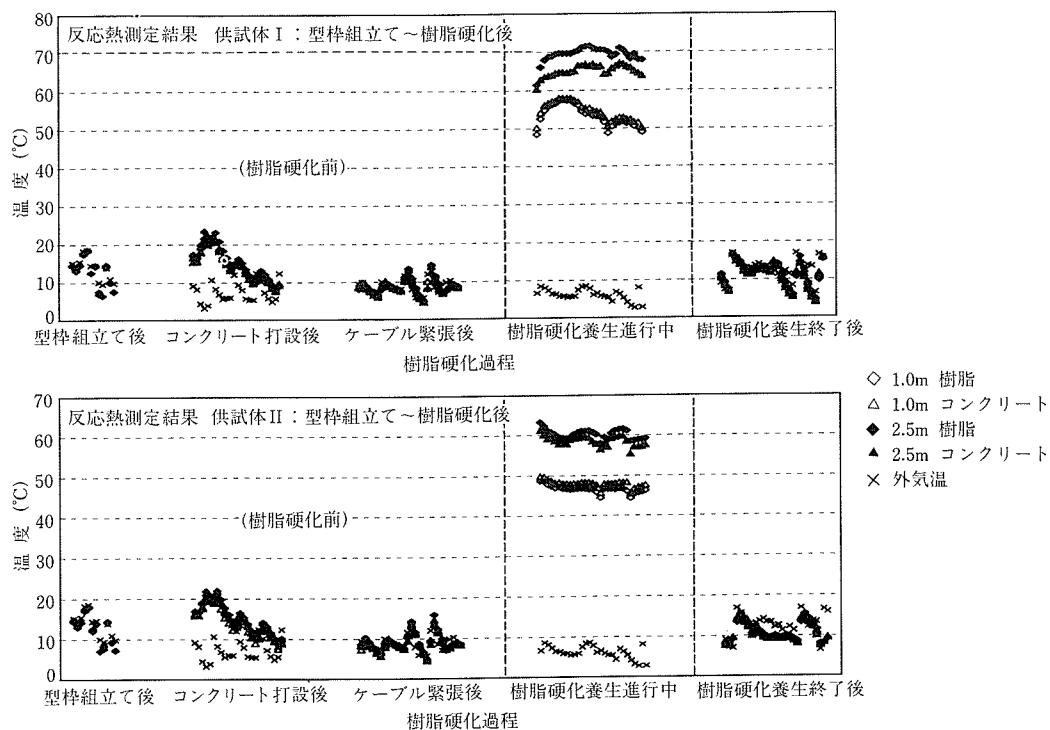


図-4 促進養生中の樹脂・コンクリート温度の経時変化

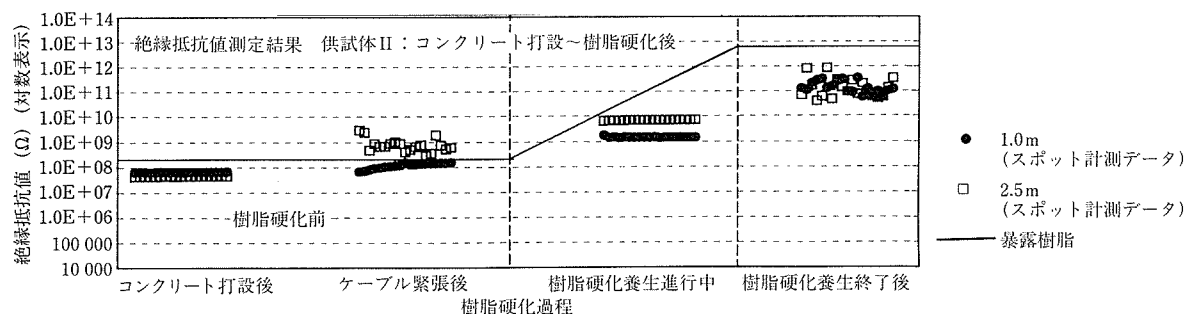
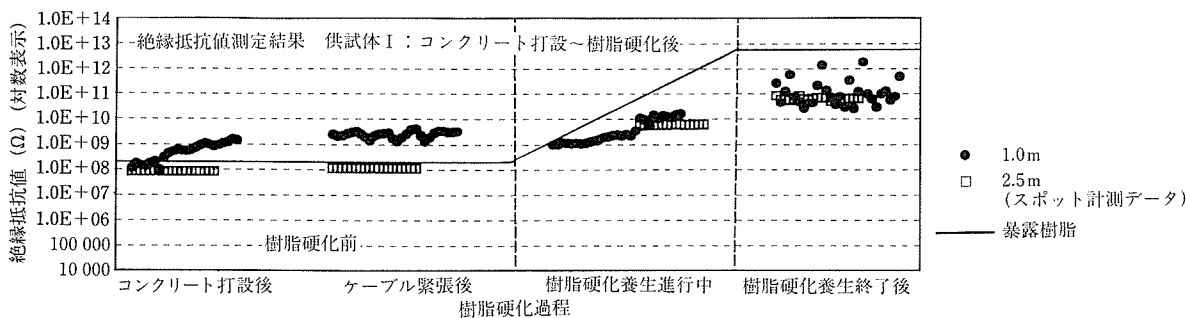


図-5 樹脂の絶縁抵抗値の経時変化

表-4 樹脂硬化過程における絶縁抵抗値の変化

施工段階	絶縁抵抗値 (Ω)		暴露樹脂 (供試体と同一条件で暴露した容器内の樹脂)	
	供試体 I	供試体 II	絶縁抵抗値	樹脂目視・押圧観察結果
蒸気養生開始前	0.8E+08~7.0E+09	0.7E~5.0E+09	2.0E+08	粘性あり
蒸気養生中	1.0E+09~2.0E+10	2.0E~9.0E+09	—	表面硬化
蒸気養生終了後	5.0E+10~2.0E+12	6.0E+10~9.0E+11	8.0E+12	内部まで完全硬化

表-5 各種絶縁材料の絶縁特性

物質	内部抵抗 (Ω・m)	表面抵抗 (Ω)
雲母(成形)	10 ¹³	5×10 ¹³
ガラス(石英)	>10 ¹⁶	3×10 ¹²
ゴム(クロロブレン)	10 ¹⁰ ~10 ¹¹	—
ゴム(天然)	10 ¹³ ~10 ¹⁵	—
大理石	10 ⁷ ~10 ⁹	5×10 ⁹
アクリル	>10 ¹³	>10 ¹⁴
エポキシ	10 ¹² ~10 ¹³	3×10 ⁷ ~>10 ¹⁴
ナイロン	10 ⁸ ~10 ¹³	10 ¹¹ ~10 ¹⁵
ポリエチレン	10 ¹⁵ ~10 ¹⁹	>10 ¹⁴

る。なお、図には樹脂硬化判定の参考値としてプラスチックケースに入れた暴露樹脂による測定結果も併記した。図-5および表-4より、以下のことが言える。

- 蒸気養生開始前(樹脂未硬化)における樹脂の絶縁抵抗値は、樹脂温度によって変動するが、おおむね1.0E+08~5.0E+09Ω前後の値を示している。
- 蒸気養生中は1.0E+09~2.0E+10Ω程度と少し高い絶縁抵抗値となり、硬化進行中であることを示している。
- 蒸気養生終了後はさらに大きく、おおむね5.0E+10~2.0E+12Ω前後の値を示し、樹脂は硬化したものと推定される。
- コンクリート中樹脂の硬化判定の参考とした暴露樹脂では、未硬化の状態では、2.0E+08Ωの絶縁抵抗値であるのに対し、完全硬化後(目視・押圧により確認)は8.0E+12Ωの値となり、コンクリート中の樹脂と同じ傾向を示している。ただ、供試体での樹脂硬化後の測

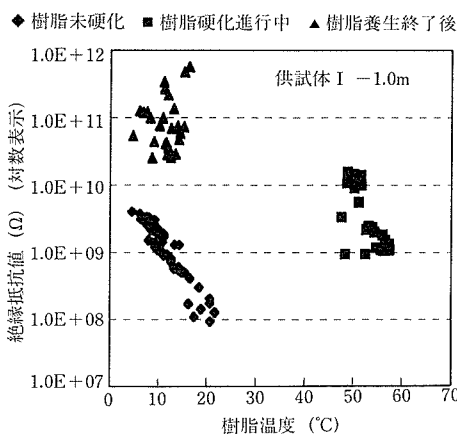


図-6 各状態における絶縁抵抗の温度依存性

定値よりも大きな値を示しているのは、コンクリート内部と容器内暴露との養生環境(とくに温度)の違いが現れたものと考えられる。

- 表-5に各種絶縁材料の一般的な抵抗値⁶⁾を示しているが、今回の測定値もこの範囲に入っており、手法としても妥当と言える。

(2) 絶縁抵抗値の温度依存性

図-4に示した樹脂温度と図-5に示した絶縁抵抗値をもとに、各養生段階ごとに樹脂温度と絶縁抵抗値との相関関係を求め図-6に示した。図-6によると次のようなことが言える。

- 蒸気養生開始前(樹脂未硬化)の絶縁抵抗値は、温度上昇とともに絶縁抵抗値が低下するという一般的⁷⁾傾向

を示し、その1次回帰直線の傾きから常温ではおおむね $10^{(10-\frac{t}{10})}$ の温度依存性があることが分かった。

- ② 蒸気養生中（樹脂硬化途中）は、わずかに温度依存性が見られるが、 $1.0E+09 \sim 10E+10 \Omega$ へ絶縁抵抗値が増大しており、樹脂が硬化過程にあることを示している。
- ③ 蒸気養生終了後（樹脂硬化と推定）の絶縁抵抗値は $1.0E+11 \Omega$ 前後にばらついているが、未硬化のときに見られた温度依存性は認められない。

6. 供試体の切断による硬化確認

プラスチックケース内の暴露樹脂の硬化および絶縁抵抗値の変化から、コンクリート内部の樹脂が硬化していると推定したが、最終測定終了後供試体を切断し、アフターボンドPC鋼材をはつり出して樹脂の硬化状況を観察した。

その結果を写真-2に示すが、シース内の樹脂は完全に硬化していることを確認した。また、切断時のPC鋼材の戻りも1mm以下とほとんどなく、供試体全長にわたっての樹脂の硬化およびシースとコンクリートとの付着が完全であることも確認した。

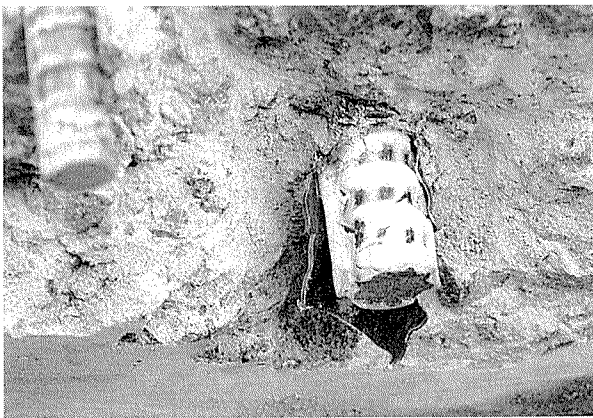


写真-2 供試体切断による樹脂硬化の確認

7. ま と め

今回の供試体を用いた実験結果をまとめると以下のようになる。

- ① 樹脂硬化過程での樹脂温度は、外気温や養生温度に敏感に追従し、今回の促進養生においては樹脂の硬化反応熱だけを抽出することはできなかった。このため、実橋の6ヵ月～1年の長期にわたって反応する場合の硬化反応熱の抽出はさらに困難と考えられ、反応熱測定法による樹脂硬化判定は不可能と判断される。
- ② 絶縁抵抗値は、樹脂硬化の程度により明確に増大するため、絶縁抵抗測定法によって樹脂硬化を判定することは可能であると言える。実橋に適用する場合、以下の絶縁抵抗値が硬化判定の目安値となる。

【樹脂未硬化時】

常温（15℃前後）で $1.0E+09 \Omega$ 以下の値を示し、しかも温度依存性が顕著に現れる。このため実橋では、絶縁抵抗とともに樹脂温度の測定も実施することが望

ましい。

【樹脂完全硬化時】

$5.0E+10 \Omega$ を超え、温度依存性は認められない。

【樹脂硬化進行中】

未硬化と完全硬化時の中間の値を示す。

8. 絶縁抵抗測定法の適用に関する留意点

今回の実験で、樹脂の硬化判定が可能であることが分かった「絶縁抵抗測定法」を今後実橋に適用する場合の留意点について述べる。

(1) 測定ポイントに関する留意点

- ① 標準断面部、拡幅部、柱頭部など、床版コンクリート断面の変化部に着目する。
- ② 山間部に架かる橋梁の場合、日照部（融雪部）と日陰部（残雪部）など、日照環境が異なる部位に着目する。
- ③ 冬季施工部と夏季施工部など四季の温度環境の違いに着目する。
- ④ 広幅員の場合、長さ方向のばらつきの有無に着目する。

(2) 測定上の留意点

- ① 電極はシースのリップを利用し、PC鋼材に接触しないよう樹脂内に確実にセットする。このため、シースの形状に応じた専用電極を作成しなければならない。
- ② 電極セット時にシースが局部的に破損するが、樹脂漏れしないように養生する。
- ③ 電極からのリード線は、配筋やコンクリート打設に支障とならないように、また断線などしないように十分な養生を行う。
- ④ 長期（6ヵ月～1年）観測となるため、リード線の端部養生を確実にを行い、防錆に留意する。
- ⑤ 電極のリード線は、型枠の継目から箱桁内などに配線しなければならないが、その箇所が床版の弱点部にならないよう留意する。

9. 今後の課題

今回の実験結果より、緊張時期の示唆あるいは樹脂硬化時期の判定など、アフターボンドPC鋼材の現場管理や品質管理の一手法としては、「絶縁抵抗測定法」が現時点での最適手法であることを確認した。ただ、今回の実験では常温下および促進養生時の高温下でのデータしか得られておらず、極寒地における絶縁抵抗の温度依存性の把握など、今後の検討課題も残されている。また、PC鋼材の緊張時期を判断するためには、「稠度」と「絶縁抵抗値」との関係性を明確に把握する必要がある。そして、できれば床版コンクリート表面から調査できる本来の非破壊手法の検討も今後の課題と言える。

10. あとがき

アフターボンドPC鋼材のような新材料、新工法の開発とその品質に関する妥当性を検証する非破壊手法の確立とは、良い意味での「いたちごっこ」と言え、建設と管理という異分野での競争は、互いの技術レベルの向上に大きく寄

与していると言える。本稿が現場での施工管理や品質管理に役立つことを期待している。

今後は、日本道路公団四国支社大洲工事事務所管内松山自動車道の「城廻橋」において、「絶縁抵抗測定法」を適用し、留意点の確認や残された課題を克服し、アフターボンドPC鋼材の樹脂硬化確認手法の技術マニュアルを作成していく所存である。

参 考 文 献

- 1) New Civil Engineer, 1992.10.8
- 2) 林寄, 南, 小林: アフターボンドPC鋼材の諸特性について, プレストレストコンクリート, Vol.32, No.4, p.91, 1990
- 3) 日本建築学会: プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, 1987.1
- 4) 川端: アンボンド工法用PC鋼材について, プレストレストコンクリート, pp.42~47, 1975.4
- 5) 室井, 石村: 入門エポキシ樹脂, (樹高分子刊行会, 1988.6
- 6), 7) 国立天文台: 理科年表, 丸善(株), 1993

【1998年9月10日受付】